冰冻圈化学：解密气候环境和人类活动的指纹

康世昌[1,2,5*]　黄　杰[2,3]　牟翠翠[4]　张玉兰[1,2]　徐建中[1]　董志文[1,2]　杜文涛[1]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 兰州 730000
2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
3 中国科学院青藏高原研究所 北京 100101
4 兰州大学 资源环境学院 兰州 730000
5 中国科学院大学 资源与环境学院 北京 100049

摘要　冰冻圈化学是一门新兴学科，是冰冻圈科学的重要分支。自工业革命以来，人类活动排放的污染物深刻影响了冰冻圈的化学成分，而全球变暖导致的冰冻圈快速退缩，也影响到冰冻圈乃至全球的生物地球化学循环，并产生了显著的气候和环境效应。文章介绍了冰冻圈化学在冰冻圈科学体系中的定位，构建了冰冻圈化学的学科框架；通过举例阐明冰冻圈化学与气候和环境变化及人类活动的联系，特别是冰冻圈化学在全球变化研究中的作用；对当今冰冻圈化学相关研究热点进行了回顾和展望。冰冻圈化学研究的不断深入，将为应对人类所面临的气候和环境问题提供重要科技支撑。

关键词　冰冻圈化学，气候变化，环境污染，人类活动，生物地球化学循环

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200302006

自工业革命以来，人类活动日益加剧，给地球环境带来深刻影响。特别是自20世纪中期以来，人口剧增，人类面临着严峻的资源、环境和社会发展等重大问题。20世纪80年代，科学家提出“全球变化”概念，逐步将地球的大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、冰冻圈和人类圈纳入“全球变化”范畴，并突出强调地球多圈层相互作用及其环境变化[1]。

在全球变暖背景下，近几十年来冰冻圈正在经历快速退缩[2]。冰冻圈快速退缩引起冰冻圈区域的生物地球化学循环发生变化，导致冰冻圈化学成分和化学过程发生改变，对区域乃至全球气候和环境变化带来强烈的反馈效应。作为链接圈层相互作用的核心纽带

*通讯作者

资助项目：国家自然科学基金委创新群体项目（41721091），第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0605），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20040500）

修改稿收到日期：2020年4月2日

之一，冰冻圈化学能为全球变化各个方面，如人类活动、环境污染、气候变化、生物地球化学循环等诸多科学研究提供基础。认识冰冻圈各要素中化学组分特征、时空格局、迁移转化归趋过程及其对气候和环境变化的响应与反馈机制，可为当今人类经济社会的可持续发展提供重要科技支撑。由此，在冰冻圈科学总体框架之下，与物理学、化学、生物学、大气科学、生态学、气候学和环境科学等内容综合交叉的冰冻圈化学应运而生。

1 冰冻圈科学与冰冻圈化学

冰冻圈是指地球表层连续分布且具一定厚度的负温圈层[3]。冰冻圈的组成要素包括陆地冰冻圈的冰川（含冰盖）、冻土（包括多年冻土、季节冻土）、积雪、河冰和湖冰，海洋冰冻圈的冰架、冰山、海冰和海底多年冻土，以及大气冰冻圈中的冻结状水体（如冰晶、冰核、冰雹等）。冰冻圈科学是研究自然背景条件下，冰冻圈各要素形成和变化的过程与机制，冰冻圈与气候系统其他圈层相互作用，以及冰冻圈变化的影响和适应的新兴交叉学科[3,4]。冰冻圈化学是研究冰冻圈各要素化学组分的时空格局、来源、迁移、转化、归趋及其对气候和环境影响的一门学科[5]；它涉及冰冻圈化学成分的地域特性、源和汇特征、生物地球化学循环过程，以及冰冻圈与其他圈层界面的化学过程等。

冰冻圈是气候系统中最为敏感的圈层，也是全球变化的放大器。冰冻圈主要分布在极地和高寒区域，受局地人类活动的影响较小；因此，冰冻圈化学作为"指纹信息"，可以反映区域或全球尺度气候与环境变化的信息，有利于获得不同气候和环境因子的演化过程。同时，冰冻圈独特的物质能量交换和快速的相变过程，对于气候变暖和人类活动极为敏感，是参与全球生物地球化学循环的重要圈层之一。在全球变暖和人类活动双重驱动下，冰冻圈生物地球化学循环与各类化学组分正在经历快速的变化过程，给气候和环境带来显著的反馈效应。

尽管冰冻圈化学是冰冻圈科学体系中的新兴研究领域，但随着冰冻圈化学学科的建设、发展和研究的深入，其必将为冰冻圈科学的发展提供支撑。此外，冰冻圈化学通过揭示多化学指标的生物地球化学循环规律，了解过去全球气候环境变迁历史和机理，并预测未来变化和服务人类发展，具有重要的科学意义和应用前景。

2 冰冻圈化学学科框架

冰冻圈化学的学科框架如图 1 所示。冰冻圈化学研究空间范围包括陆地冰冻圈、海洋冰冻圈和大气冰冻圈；主要研究对象包括冰冻圈中的微量气体、无机和有机化学组分、稳定和放射性同位素、微生物等；研究时间范围覆盖小时、天、季节、年、多年等多个不同维度。冰冻圈化学研究内容主要包括 3 个方面。

（1）冰冻圈化学相关的基本物理、化学和生物过程。基本物理过程主要包括大气成分的干湿沉降、清除过程、雪冰离子淋融和脉冲、冻土淋溶作用、海冰排盐等过程；化学过程主要包括同位素分馏、光化学作用、氧化还原反应等；生物学过程包括甲基化、甲

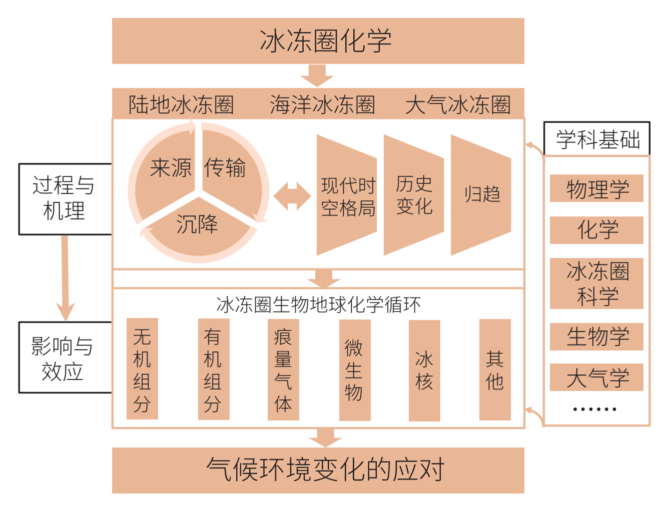


图 1　冰冻圈化学学科架构
根据文献 [5] 改绘

烷的微生物过程、硝化与反硝化等。

（2）冰冻圈化学组分的时空格局及其来源。研究大气冰冻圈、陆地冰冻圈、海洋冰冻圈中的无机成分（如化学离子、不溶微粒、元素、黑碳等）和有机成分（如有机质、持久性有机污染物等）的时空分布、传输和来源等；运用同位素的指纹特征研究化学成分的自然和人为来源；以及利用雪冰记录研究人类活动排放污染物的变化历史等。

（3）冰冻圈生物地球化学循环的影响与效应。研究冰冻圈不同要素的关键生物地球化学过程；评估气候变暖和人类活动加剧双重影响下，冰冻圈生物地球化学循环的气候和环境效应，为应对未来气候环境变化提供科技支撑。

3 冰冻圈化学与气候环境变化及人类活动

冰冻圈化学组分与人类活动和自然环境变化密切相关。在极少人类活动干扰状态下，冰冻圈化学组分及其变化由自然环境过程所主导。然而，当人类活动深刻影响和改变自然环境的背景下，冰冻圈中化学成分及其变化则受到人类排放污染物的主导。冰冻圈化学组分的时空格局、迁移、转化和归趋等过程与气候和环境产生直接关联，很大程度上已重塑冰冻圈化学组分的生物地球化学循环规律。冰冻圈化学在气候和环境变化研究中有诸多应用，起到了重要的支撑作用，本文仅列举比较典型的研究例证。

3.1 冰冻圈化学与气候环境变化

冰冻圈环境介质如冰川是记录全球气候变化信息的重要载体，其化学记录作为一种独特的气候变化代用资料，使冰冻圈化学广泛应用于全球气候变化研究之中，已取得一系列重要气候变化发现。例如，20 世纪 50 年代研究人员发现高纬度冰冻圈地区降水中稳定同位素与气温之间存在显著的正相关关系[6]，正是这一发现，使气候变化研究迈入新的里程。迄今已有大量冰芯氢氧稳定同位素历史重建结果与近百年来器测资料研究结果相一致，表明全球气候正在经历快速变暖过程[7-10]。

冰冻圈化学中氧及硫元素同位素的非质量分馏（MIF）效应在气候环境变化研究中受到研究人员的极大关注，其在大气（包括古大气）的氧化能力及氧化过程、矿床成因、火山活动对气候的影响，以及硫循环等研究中显示出了强大的示踪能力[11,12]。近年来，MIF 效应也被成功应用到冰冻圈相关研究领域。通过分析格陵兰冰盖计划 2（GISP2）深冰芯中硝酸盐 $\delta^{17}O$ 信号，重建了过去 10 万年大气氧化能力的变化情况，揭示了大气（古大气）氧化能力随气候变化的关键信息[11]；通过对珠峰南坡塀其尔（Gokyo）湖泊沉积物中硫酸盐 $\delta^{33}S$ 及 $\delta^{36}S$ 信号的分析，重建了过去 200 年珠峰地区硫循环历史，进一步促进了人们对高海拔地区环境变化特征的认识[12]。

此外，冰芯中粉尘及其他化学组分不但记录干旱化等自然过程，而且能够敏感地记录大气环流模态和强度的变化，在反映气候系统演化方面具有独特的优势。全球冰冻圈区域冰芯中粉尘化学记录反映出大气粉尘荷载量和大气环流等变化历史异同。例如，冰芯粉尘记录表明青藏高原中部和南部 20 世纪以来粉尘活动由于环流强度变化而呈现出减弱的趋势[14]。

3.2 冰冻圈化学与人类活动

冰冻圈化学记录就像是一部史书，记录了不同时期雪冰的化学状况，这为“解读”过去的气候和环境变化提供了基础。工业革命以来，人类活动在加速改变社会发展历史进程的同时，也给环境造成了巨大破坏，并逐渐成为影响环境中化学元素再分配的重要因素。化学污染物组分一般以很低的天然含量广泛存在于自然界中，但人为排放污染物的增多已经造成了全球范围的环境污染。冰冻圈主要处于偏远地区，人口相对稀少且远离工、农业排放源区，受人类活动直接干扰较小。因此，可以将人类释放污染物在极地和山地冰川等冰冻圈环境中的变化过程，作为评价人类活

动对大气环境影响的代用指标。

冰川（冰盖）和高山湖泊作为冰冻圈的重要组成部分，其化学成分主要来自大气的干湿沉降，是大气成分的天然档案库。与其他资料相比，冰川和高山湖泊的相关研究资料具有记录连续、分辨率高、保真性强、沉积后变化微弱的优势，能够较为准确地记录人类释放污染物的变化历史。

冰芯和冰冻圈高山湖泊化学记录是解密人类排放污染物历史变化的重要“指纹”。以重金属汞（Hg）污染物为例，全球已有多支冰芯和湖芯历史记录研究[15-18]。从图2来看，自工业革命以来，全球冰冻圈区域大气汞沉降均呈现快速上升的趋势，与全球人类活动大量生产汞和快速释放汞污染物密切相关[19]。随着人类的环境保护意识增强，近几十年来欧洲和北美发达国家采取强力减排措施，这些地区的人类活动释放的汞污染物也呈一定的下降趋势[15,16]（图2）。然而，亚洲地区阿尔泰山和各拉丹冬冰芯汞浓度在最近几十年仍表现为显著增加趋势[17,18]，这与亚洲快速的经济和工业发展密切相关。研究表明，亚洲已成为人类活动汞排放的最重要的源区，约占全球总排放量的一半以上[20]。

青藏高原冰芯和湖芯亦共同记录了自工业革命以来尤其是二战之后，大气汞沉降通量快速增加；该记录与南亚地区近期人为汞排放的增长相对应，揭示出南亚地区人为排放污染物是影响青藏高原大气汞本底和沉降通量的主要原因[21]。以上事实表明，人类活动释放的污染物通过大气传输对全球环境已产生了重要影响，因此冰冻圈成为评价人类活动污染程度和历史变化的理想研究场所。通过冰冻圈介质忠实记录的事实，可以警示各国政府应当严格管控和削减大气污染物的排放。

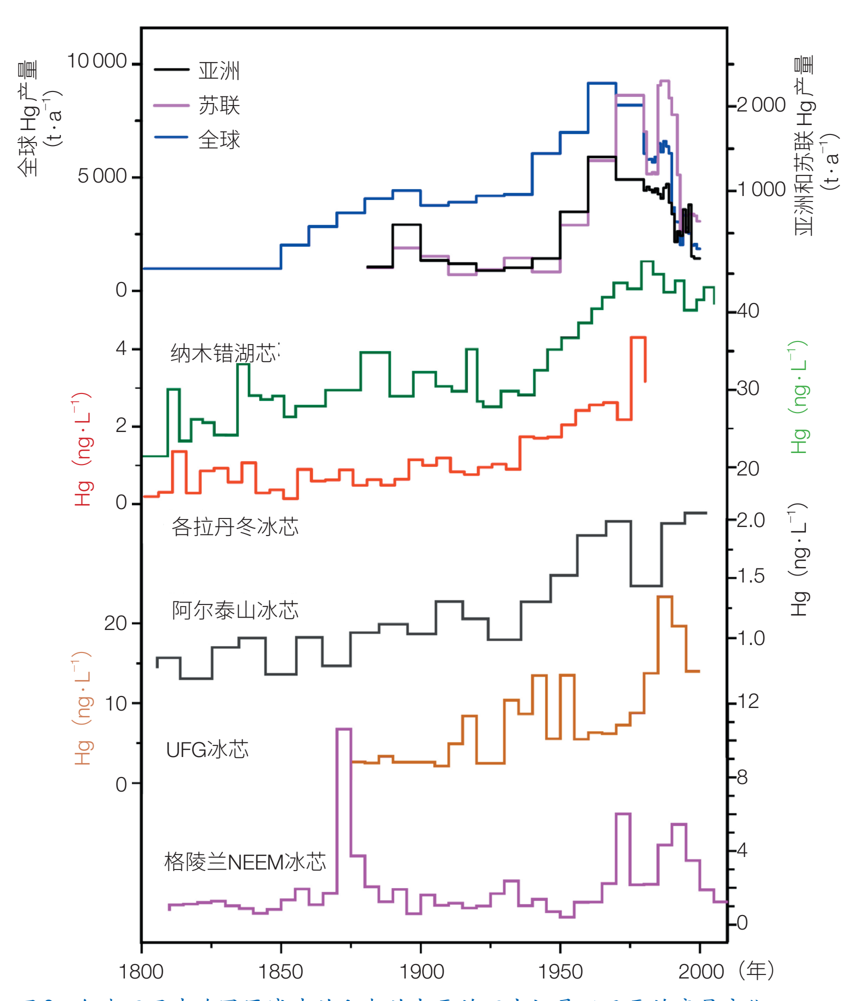


图2 全球不同冰冻圈区域冰芯和湖芯中汞的历史记录以及汞的产量变化

数据来源：纳木错湖芯和各拉丹冬冰芯[8]；阿尔泰山冰芯[9]；UFG冰芯[6]；格陵兰NEEM冰芯[7]

4 冰冻圈化学的热点科学问题

4.1 多年冻土退化与碳循环

北半球多年冻土区有机碳储量为1 400—1 850 Pg C，约占全球土壤碳库的50%，是大气碳储量的2倍多[22]。全球快速升温正在加剧多年冻土退化，导致原本冻结封存的有机碳融化分解，将大量温室气体（如CO_2和CH_4）释放到大气中，而大气中增加的温室气体进一步加速全球变暖。因此，多年冻土退化对气候变化具有强烈的正反馈效应[23]（图3）。然而，多年冻土的碳源和碳汇效应在不同区域表现出了巨大的差异，对未来的评估存在较大偏差。具体而言，气候变暖引起土壤

碳，特别是深层土壤碳释放量的评估差异很大[23]。北极地区多年冻土退化后，还有可能形成热融湖塘而增加 CH_4 排放，而这种地表改变引起的温室气体气候效应机理仍不清楚[24]。此外，尽管全球变暖增加了局部地区土壤碳的释放，但变暖又促进了植被生长，从而吸收更多的碳[25]。因此，对上述过程认识的不足导致人们对未来碳循环和气候变化的评估存在很大的不确定性。

多年冻土区碳的生物地球化学循环过程是发展和改进地球系统模式中的重要内容之一。目前，几乎所有地球系统模式研究主要关注多年冻土缓慢升温过程，在富冰多年冻土区，多年冻土退化会导致地表快速崩塌，形成热喀斯特[13]，但是，这些过程比较复杂而未被充分研究，因此没有被纳入到耦合模型中，导致碳循环的评估具有很大不确定性。气候变暖导致多年冻土崩塌的速度加快，使得生态系统从净碳吸收转变为净碳释放，而植被的重新生长也能部分抵消碳释放[26]。另外，溶解性有机碳随着径流发生跨区域输移，并改变其生物可利用性；其释放通量对多年冻土退化的响应也是评估多年冻土碳反馈潜力的不确定因素之一[27]。

除了陆地多年冻土，海底多年冻土对气候变化也有重要影响。然而，由于目前对海底多年冻土分布、CH_4 水合物存储及渗透过程[28]、沉积物有机碳储量及分解的生物地球化学机制不清楚，研究人员难以系统评估海底多年冻土碳库的气候效应。因此，在气候变暖背景下要准确评估多年冻土退化对气候变化的反馈，亟待解决的科学问题是：明确陆地和海底多年冻土退化过程中碳分解和稳定的化学机制，厘清多年冻土缓慢升温和快速崩塌过程中温室气体释放速率、方式及其与植被碳吸收之间的平衡关系。

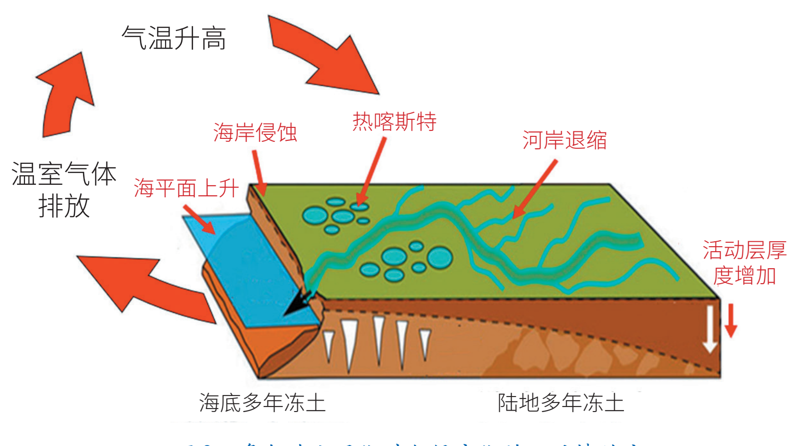


图 3　多年冻土退化对气候变化的正反馈效应

4.2 冰冻圈退缩的环境效应

人类活动排放的污染物通过大气环流传输到偏远的冰冻圈，可以被封存在冰川和冻土之中[21,29-31]。*因此，冰冻圈也是人类活动释放大气污染物的“储存库”*[31-32]。随着全球气候变暖加剧，冰冻圈快速消融，其储藏的有毒污染物将会快速释放[32-34]，即产生污染物的“二次释放”。当前世界各国已经关注到冰川融化和多年冻土退化的环境危害[35]。例如，在过去 40 年内我国西部冰川已通过冰川融水释放出约 2 500 kg 汞污染物并进入下游生态系统[32]，而且增温背景之下的冰川表面冰尘积聚区极有可能是汞甲基化的新场所[29]。北极多年冻土区亦存储了大量的汞[31]，气候变暖导致北极多年冻土退化，从而增加冻土区汞的释放和迁移。北极地区每年约有 20 000 kg 的汞污染物会进入河流并输入到北冰洋中[34]。这些冰川和冻土释放的汞污染物和持久性有机污染物（POPs）等随地表径流进入下游生态系统中，将可能对依靠冰冻圈融水补给的河流下游地区生态环境产生潜在影响，所导致的环境污染风险不容小觑。

*冰川和冻土中不仅含有上述有毒污染物，而且极有可能封存着古老的微生物。*这些古老生命体在气候变暖之前暂且还被冻结在冰冻圈之中，不参与冰冻圈与其他圈层之间的迁移。然而一旦冰川消融和冻土退化，极有可能释放冰封万年甚至数十万年的微生物并进入人类生存环境。

而这种极端后果，将可能是下一场人类无法承受的灾难。已有研究发现在青藏高原深孔冰芯样品中存在古老病毒，其中28种是新病毒[36]。同样地，在多年冻土中的未冻水内，经常被发现有微生物存在，其中也可能含有古老的病毒。早期在多年冻土中提取了一种被封存长达3万年的病毒[37]，在实验室对其重新加热发现病毒仍能迅速复活。这也意味着，这些冻结在冻土中的未知病原体可能会因气候变暖而再次苏醒。随着冰冻圈继续快速退缩，“沉睡”在冰冻圈中的未知病毒重新被激活将对产生何种环境和健康效应，值得继续深入研究。

4.3 冰冻圈化学的气候反馈效应

作为冰冻圈化学重要组分，吸光性成分（如黑碳、有机碳、粉尘等）的气候反馈效应备受关注。雪冰中吸光性成分产生的直接影响是降低雪冰反照率，即通过雪冰表面变暗后吸收更多太阳辐射，使得雪冰增温和雪冰消融加强[38,39]。

在亚洲高山冰冻圈区域，沉降到雪冰中的吸光性成分的反照率反馈对地表气温具有显著增温作用，可达0.1℃—1.5℃[40]，这成为仅次于CO_2的重要短生命周期气候强迫因子[41]。青藏高原冰川消融期粒雪中黑碳和粉尘共同作用对反照率降低的贡献可达20%—50%，所导致的辐射强迫可达100 $W \cdot m^{-2}$。由于雪冰中黑碳和粉尘的气候反馈作用，青藏高原地区冰川消融增加约20%，积雪消融增加5—25 mm · w.e.，积雪持续时间缩短3—4天[21]。近年来，北极地区增温幅度可达全球平均水平的2倍以上。由于雪冰表面的高反照率和强烈的反馈过程，北极地区气候受雪冰中吸光性成分的影响显著，而吸光性成分是除温室气体外造成北极变暖的重要因素[42]。北极积雪黑碳导致的辐射强迫可达0.17 $W \cdot m^{-2}$[43]，由此带来的温升幅度可达0.24℃[44]。吸光性成分可导致北纬66.5°以北每年7—9月海冰减少约1%[44]和格陵兰冰盖消融增加约8 $Gt \cdot a^{-1}$（约占总消融量的6.8%）[45]。冰冻圈的持续消融，特别是冰川的消融导致其表面的吸光性成分富集，从而进一步加速冰川消融。由此，雪冰中的吸光性成分的气候效应将会越来越显著，在全球范围定量评估其影响及水文水资源效应是亟待解决的科学问题。

5 结语

随着实验室分析测试和野外自动监测技术的提升，冰冻圈化学相关研究快速发展，通过多学科交叉融合，从过去主要侧重化学组分在冰冻圈介质中的迁移转换归趋等过程的认识，逐渐发展至与气候和环境效应等内容的深度融合。毋庸置疑，冰川（冰盖）、冻土、河冰和湖冰、海冰等冰冻圈要素是记录气候环境变化及人类活动的独特介质，具有不可替代的优势；未来随着分析测试新技术的发展和日趋完善，冰冻圈环境中更多化学组分分析测定将逐一实现；因此，冰冻圈化学的研究内容还会不断拓展延伸。

冰冻圈化学已逐渐成为冰冻圈科学重要的分支学科，但冰冻圈化学的学科构建、内涵和外延需要在研究和实践中不断完善和发展。在未来学科发展中，迫切需要通过建立全球立体观测网络体系，获得全球冰冻圈化学成分和迁移转化的第一手资料，并结合实验室分析测试和模拟，阐述冰冻圈环境介质中化学成分迁移转化过程和机理，科学精准认知冰冻圈化学成分变化与生物地球化学循环的自然和人为过程、机理和影响，揭示全球变暖和人类活动加剧背景下冰冻圈的气候和环境效应，从而为全球气候变化应对和区域可持续发展提供科技支撑。

参考文献

1 Baker F W G. The International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP): A study of global change. Environmental Conservation, 1988, 15: 355-356.

2 康世昌，郭万钦，钟歆玥，等.全球山地冰冻圈变化、影响

与适应. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 143-152.

3 秦大河, 姚檀栋, 丁永建. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2017.

4 Qin D H, Ding Y J, Xiao C D,, et al. Cryospheric science: Research framework and disciplinary system. National Science Review, 2018, 5(2): 255-268.

5 康世昌, 黄杰, 牟翠翠, 等. 冰冻圈化学. 北京: 科学出版社, 2020.

6 Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

7 Yao T D, Shi Y F, Thompson L G. High resolution record of paleoclimate since the Little Ice Age from the Tibetan ice cores. Quaternary International, 1997, 37: 19-23.

8 Tian L D, Yao T D, Li Z, et al. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111: D13103.

9 Kang S C, Zhang Y J, Qin D H, et al. Recent temperature increase recorded in an ice core in the source region of Yangtze River. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(6): 825-831.

10 Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains. Quaternary Science Reviews, 2018, 188: 1-14.

11 Geng L, Murray L T, Mickley L J, et al. Isotopic evidence of multiple controls on atmospheric oxidants over climate transitions. Nature, 2017, 546(7656): 133-136.

12 Lin M, Kang S C, Shaheen R, et al. Atmospheric sulfur isotopic anomalies recorded at Mt. Everest across the Anthropocene. PNAS, 2018, 115: 6964-6969.

13 Mu C C, Abbott B W, Zhao Q, et al. Permafrost collapse shifts alpine tundra to a carbon source but reduces N_2O and CH_4 release on the northern Qinghai-Tibetan Plateau. Geophysical Research Letters, 2017, 44: 8945-8952.

14 Kang S C, Mayewski P A, Qin D H, et al. Glaciochemical records from a Mt. Everest ice core: Relationship to atmospheric circulation over Asia. Atmospheric Environment, 2002, 36(21): 3351-3361.

15 Schuster P F, Krabbenhoft D P, Naftz D L, et al. Atmospheric mercury deposition during the last 270 years: A glacial ice core record of natural and anthropogenic sources. Environmental Science & Technology, 2002, 36(11): 2303-2310.

16 Zheng J. Archives of total mercury reconstructed with ice and snow from Greenland and the Canadian High Arctic. Science of the Total Environment, 2015, 509-510: 133-144.

17 Kang S C, Huang J, Wang F Y, et al. Atmospheric mercury depositional chronology reconstructed from lake sediments and ice core in the Himalayas and Tibetan Plateau. Environmental Science & Technology, 2016, 50: 2859-2869.

18 Eyrikh S, Eichler A, Tobler L, et al. A 320 year ice-core record of atmospheric Hg pollution in the Altai, Central Asia. Environmental Science & Technology, 2017, 51(20): 11597-11606.

19 Hylander L D, Meili M. 500 years of mercury production: Global annual inventory by region until 2000 and associated emissions. Science of the Total Environment, 2003, 304: 13-27.

20 Pacyna E G, Pacyna J M, Sundseth K, et al. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020. Atmospheric Environment, 2010, 44(20): 2487-2499.

21 Kang S C, Zhang Q G, Qian Y, et al. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: current progress and future prospects. National Science Review, 2019, 6(4): 796-809.

22 Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. Biogeosciences, 2014, 11(23):

6573-6593.
23 Schuur E A G, McGuire A D, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature, 2015, 520: 171-179.
24 Walter A K, Daanen R, Anthony P, et al. Methane emissions proportional to permafrost carbon thawed in Arctic lakes since the 1950s. Nature Geoscience, 2016, 9: 679-682.
25 Sistla S A, Moore J C, Simpson R T, et al. Long-term warming restructures Arctic tundra without changing net soil carbon storage. Nature, 2013, 497: 615-618.
26 Turetsky M R, Abbott B W, Jones M C, et al. Carbon release through abrupt permafrost thaw. Nature Geoscience, 2020, 13: 138-143.
27 Mu C C, Zhang F, Chen X, et al. Carbon and mercury export from the Arctic rivers and response to permafrost degradation. Water Research, 2019, 161: 54-60.
28 Ferré B, Jansson P G, Moser M, et al. Reduced methane seepage from Arctic sediments during cold bottom-water conditions. Nature Geoscience, 2020, 13(2): 144-148.
29 Huang J, Kang S C, Ma M, et al. Accumulation of atmospheric mercury in glacier cryoconite over western China. Environmental Science & Technology, 2019, 53(12): 6632-6639.
30 Huang J, Kang S C, Zhang Q G, et al. Spatial distribution and magnification processes of mercury in snow from high-elevation glaciers in the Tibetan Plateau. Atmospheric Environment, 2012, 46: 140-146.
31 Schuster P F, Schaefer K M, Aiken G R, et al. Permafrost stores a globally significant amount of mercury. Geophysical Research Letters, 2018, 45(3): 1463-1471.
32 Zhang Q G, Huang J, Wang F Y, et al. Mercury distribution and deposition in glacier snow over western China. Environmental Science & Technology, 2012, 46(10): 5404-5413.
33 Chen M, Wang C, Wang X, et al. Release of perfluoroalkyl substances from melting glacier of the Tibetan Plateau: Insights into the impact of global warming on the cycling of emerging pollutants. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124: 7442-7456.
34 Mu C, Schuster P F, Abbott B W, et al. Permafrost degradation enhances the risk of mercury release on Qinghai-Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 2020, 708: 135127.
35 Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. Environmental Research Letters, 2010, 5(1): 015101.
36 Zhong Z P, Solonenko N E, Li Y F, et al. Glacier ice archives fifteen-thousand-year-old viruses. bioRxiv, 2020, doi: 10.1101/2020.01.03.894675.
37 Legendre M, Bartoli J, Shmakova L, et al. Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology. PNAS, 2014, 111: 4274-4279.
38 Bond T, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013, 118: 5380-5552.
39 Xu B Q, Cao J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. PNAS, 2009, 106(52): 22114-22118.
40 Ji Z M, Kang S C, Zhang Q G, et al. Investigation of mineral aerosols radiative effects over High Mountain Asia in 1990-2009 using a regional climate model. Atmospheric Research, 2016, 178-179: 484-496.
41 Ramanathan V, Carmichael G R. Global and regional climate changes due to black carbon. Nature Geoscience, 2008, 1(4): 221-227.
42 Flanner M G, Zender C S, Randerson J T, et al. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112: D11202.
43 Jiao C, Flanner M G, Balkanski Y, et al. An AeroCom

assessment of black carbon in Arctic snow and sea ice. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(5): 2399-2417.

44 Flanner M G. Arctic climate sensitivity to local black carbon. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013, 118(4): 1840-1851.

45 Li Y, Flanner M G. Investigating the impact of aerosol deposition on snowmelt over the Greenland Ice Sheet using a large-ensemble kernel. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(21): 16005-16018.

Cryospheric Chemistry: Fingerprint to Decipher Climate/Environmental Changes and Anthropogenic Activities

KANG Shichang[1,2,5*] HUANG Jie[2,3] MU Cuicui[4] ZHANG Yulan[1,2] XU Jianzhong[1] DONG Zhiwen[1,2] DU Wentao[1]

（1 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;

3 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

5 College of Resources and Environment,University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Cryospheric chemistry is a new discipline and one of important branch of cryospheric science. Pollutant emissions from anthropogenic activities have greatly altered the status of chemical components in the cryospheric environment since the Industrial Revolution. When this scenario is coupled with the rapid shrinkage of cryosphere under global warming, both anthropogenic activity and global warming have cooperatively influenced the biogeochemical cycling in the cryosphere and even on a global scale, which results in significant effects on climate and environment. In this paper, firstly, the role of cryospheric chemistry in the cryospheric science is introduced, and the discipline framework and research focuses of cryospheric chemistry are summarized. Secondly, the coupling relationship among cryospheric chemistry and climate/environmental changes, and anthropogenic activities, with emphasis on this relationship in the research field of global change, was exemplified. Lastly, we summarize a review and prospect of hot topics in the current research of cryospheric chemistry. The rapid development of cryospheric chemistry will provide important scientific and technological support for tackling the climate and environmental issues that challenge human survival and development.

Keywords cryospheric chemistry, climate change, environmental pollution, anthropogenic activities, biogeochemical cycling



康世昌 中国科学院西北生态环境资源研究院副院长，中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室主任、研究员，中国科学院大学岗位教授。国际冰川学会（IGS）理事，气候与冰冻圈计划（CliC）学术指导组（SSG）成员，国际期刊 *Atmospheric Research* 副主编，政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估（AR6）特别报告主要作者之一。中国科学探险协会副理事长，中国冰冻圈科学学会（筹）副秘书长。长期从事冰冻圈与环境变化方面的研究，在冰冻圈环境化学领域取得了大量成果。组织开展了青藏高原大气污染物和冰冻圈协同观测研究，揭示了南亚污染物跨境传

* Corresponding author

输到青藏高原的过程和途径，剖析了黑碳等吸光性成分在冰冻圈快速变化过程中的作用和机制。

E-mail: shichang.kang@lzb.ac.cn

KANG Shichang Ph.D., Director of the State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS), Professor of University of Chinese Academy of Sciences. Dr. Kang is a council member of International Glaciology Society (IGS) and member of Scientific Steering Group of the Climate and Cryosphere (CliC), Associate Editor of *Atmospheric Research*, and lead author for the IPCC AR6 special report on “the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate”. He is the vice chairman of China Association for Scientific Expedition and deputy secretary general of China Society of Cryospheric Science. Dr. Kang mainly focuses on cryospheric and climate changes, environmental chemistry of snow/ice and atmosphere. He has organized and established a monitoring network of the Atmospheric Pollution and Cryospheric Change (APCC) on the Tibetan Plateau, revealed the sources and transport processes of atmospheric pollutants from South Asia to the Tibetan Plateau and clarified the role and mechanism of light-absorbing impurities such as black carbon in the rapid cryospheic change.

E-mail: shichang.kang@lzb.ac.cn

■责任编辑：张帆